

УДК 621.924.5

Д. В. Криворучко, д-р техн. наук, В. Г. Евтухов, канд. техн. наук,  
И. Г. Чижов, Сумы, Украина

## ОЦЕНКА ОБРАБАТЫВАЕМОСТИ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ РЕЗАНИЕМ

Метою цієї роботи є вивчення можливості оцінки оброблюваності різанням на основі на даних про фізико-механічні властивості конструкційних матеріалів.

Використовуючи діаграми істинних напружень різних конструкційних матеріалів встановлена прямо пропорційна залежність між теоретичною кількістю енергії руйнування одиниці об'єму конструкційних матеріалів та їх границею міцності на розтягання. Однак реальний процес різання супроводжується втратами енергії на тертя. Ці втрати становлять в середньому для більшості конструкційних матеріалів (35 - 45)%. Не дивлячись на це збереження у загальному пропорційного зв'язку між величиною границі міцності на розтягання і питомою роботою, що витрачається при різанні, дозволяє використовувати цей критерій для оцінки оброблюваності конструкційних матеріалів.

**Ключові слова:** границя міцності на розтягання, питома робота руйнування, сили різання, допустима швидкість різання

Целью настоящей работы является изучение возможности оценки обрабатываемости резанием на основе на данных о физико-механических свойствах конструкционных материалов.

Используя диаграммы истинных напряжений различных конструкционных материалов установлена прямо пропорциональная зависимость между теоретическим количеством энергии разрушения единицы объема конструкционных материалов и их временным сопротивлением на растяжение. Однако реальный процесс резания сопровождается потерями энергии на трение. Эти потери составляют в среднем для большинства конструкционных материалов (35 – 45) %. Несмотря на это, сохранение общей пропорциональной связи величины временного сопротивления на растяжение с удельной работой, затрачиваемой при резании позволяет использовать этот критерий для оценки обрабатываемости конструкционных материалов.

**Ключевые слова:** временное сопротивление на растяжение, удельная работа разрушения, силы резания, допустимая скорость резания

The purpose of this work is to study the possibility of estimation of machinability based on physico-mechanical properties of structural materials.

Using the diagrams of the true stresses of various structural materials, a linear relationship is found between the theoretical amount of energy for fracture of a unit volume of structural materials and their tensile strength. However, the actual cutting process is accompanied by energy losses to friction. These losses range from 35 to 45% for most structural materials in average. Thus, maintaining the overall linear relationship of the value of the tensile strength with the specific work consumed during cutting makes it possible to use this criterion for evaluating the machinability of structural materials.

**Keywords:** tensile strength, specific fracture work, cutting force, permissible cutting speed

В современном производстве основным фактором выбора рационального метода обработки является экономическая эффективность его применения в заданных условиях для заданных материалов.

Сравнение экономической эффективности резанием различных конструкционных материалов часто выполняют по критериям обрабатываемости. Данное понятие определяет сумму взаимосвязанных физико-механических свойств материала, отвечающих за удаление припуска и целенаправленное формирование технологических показателей механической обработки, что связано, в первую очередь, с различными параметрами напряженности протекания процесса резания. [1].

В современном машиностроении используется огромное количество различных конструкционных материалов, отличающихся своими основными физико-механическими характеристиками такими как предел текучести при растяжении  $\sigma_t$ , временное сопротивление (предел прочности при растяжении)  $\sigma_b$ , твердость по Бринеллю HB, относительное удлинение образца при разрыве  $\delta$ , относительное сужение площади поперечного сечения образца при разрыве  $\psi$  и др. Из опыта известно, что обрабатываемость резанием конструкционных материалов также различна.

Существуют различные способы оценки обрабатываемости материалов. Считают, что обрабатываемость связана с изнашивающим действием, оказываемым материалом на контактные поверхности инструмента [2]. В итоге, одной из основных характеристик обрабатываемости материалов рассматривают допускаемую скорость резания, которая соответствует нормативному значению периода стойкости инструмента [1, 2]. Оценка обрабатываемости может быть выполнена по стойкости инструмента, производительности обработки в заданных условиях и другим критериям. Более комплексная оценка обрабатываемости конструкционных материалов, на наш взгляд, осуществляется по коэффициенту полезного действия системы резания [3]. Однако, все эти подходы предполагают наличие обширных и трудоемких экспериментальных исследований по определению функциональных зависимостей сил резания от режимов резания в различных условиях.

Поэтому **целью настоящей работы** является изучение возможности оценки обрабатываемости резанием на основе на данных о физико-механических свойствах конструкционных материалов.

В этом контексте интересной является идея оценки обрабатываемости резанием по теоретическим затратам энергии на разрушение или удельной работе разрушения, затраченной на снятие заданного припуска, отнесенного к объему срезанного при этом материала [3, 4]. Данный показатель обрабатываемости резанием может послужить классификационной характеристикой для различных конструкционных материалов и быть использован для оптимизации технологических процессов механической обработки. Вместе с тем, описанные в указанных работах подходы для определения энергии разрушения при резании основываются на

экспериментальных данных о силах резания. С другой стороны, используя диаграммы растяжения конструкционных материалов в истинных напряжениях [5] можно определить теоретическое количество энергии для разрушения единицы объема ( $A_{\text{теор}}$ ) заданного металла. При использовании указанных диаграмм теоретическая работа разрушения определяется по формуле [4]:

$$A_{\text{теор}} = \frac{S_B \Psi_K}{2} + \frac{S_B + S_K}{2} (\Psi_K - \Psi_B) + \frac{S_K + S_1}{2} (\Psi_1 - \Psi_K), \quad (1)$$

где  $S_B$  и  $S_K$  – истинные напряжение в моменты начала образования шейки на образце и разрушения образца при растяжении соответственно;  $S_1$  – истинное напряжение разрушению;  $\Psi_B$  и  $\Psi_K$  – относительное сужение в моменты начала образования шейки на образце и разрушения образца при растяжении соответственно;  $\Psi_1$  – относительное сужение после разрушения образца.

Результаты расчетов по определению теоретической работы разрушения различных конструкционных материалов на основе справочных данных о их физико-механических свойствах приведены в таблице 1.

Как видно из рис. 1, наблюдается прямо пропорциональная зависимость, выражаемая единым уравнением (2) для всех представленных в таблице 1 разнообразных по химическому составу и физико-механическим свойствам групп конструкционных материалов. Аппроксимация дает уравнение:

$$A_{\text{теор}} = \frac{(\sigma_B + 6)}{0,61}, \quad (2)$$

Расхождение полученных результатов для различных групп металлов не превышает 15 %, что вполне допустимо. Исключение составляют группы цветных сплавов, где особняком расположены алюминиевые сплавы АЛ-9 и АК4-1, сильно отличающийся по своему химическому составу и физико-механическим свойствам от группы цветных сплавов на основе меди. В целом, полученные отличия можно объяснить и некоторыми расхождениями значений их физико-механических свойств, представленных в различных изданиях марочников сталей и сплавов.

Фактическую механическую работу разрушения поверхностного слоя заготовки в процессе резания  $A_{\text{мех}}$ , в частности, при точении образцов из различных конструкционных материалов, можно определить по силам резания из зависимости [4]:

$$A_{\text{мех}} = P_z L \cos \alpha, \quad (3)$$

где  $P_z$  – тангенциальная составляющая силы резания при точении образцов;

$L$  – длина срезаемой стружки;

$\cos \alpha = \tan^{-1} \frac{S_0}{\pi d}$  – угол между направлениями действия силы резания  $P_z$  и поверхностью резания;

$S_0$  – подача инструмента на 1 оборот заготовки;

$d$  – диаметр обрабатываемой заготовки.

Таблица 1 – Определение теоретической работы разрушения различных конструкционных материалов

№ п/п	Обрабатываемый материал (в состоянии поставки)	Механические свойства			Теоретическая работа разрушения ( $A_{\text{теор}}$ ), кгс·мм/мм <sup>3</sup>
		$\sigma_B$ , МПа (кгс/мм <sup>2</sup> )	НВ 10 <sup>-1</sup> , МПа	$\Psi$ , %	
1	ШХ15	648 (66)	195	40	106,3
2	40Х13	637 (65)	150	30	102,5
3	60С2	1029 (105)	269	25	184,5
4	ВТ3-1	932 (95)	190	38	171,1
5	50	559 (57)	190	38	107
6	9ХС	775 (79)	240	55	128,4
7	38Х2МЮА	726 (74)	250	40	120,4
8	СЧ21-40	343 (35)	195	28	56,3
9	12Х18Н10Т	549 (56)	169	55	102,8
10	12Х13	588 (60)	190	45	95,3
11	КЧ37-12	363 (37)	140	13	68,2
12	20ХМ	785 (80)	179	50	132,2
13	Ст3сп	343 (35)	120	55	64,7
14	15Г	402 (41)	163	55	77
15	Л80	304 (31)	110	50	56,8
16	М1	226 (23)	90	35	39,1
17	БрОЦС5-5-5	196 (20)	70	34	52,3
18	АЛ-9	196 (20)	60	7,1	67,9
19	У8	638 (65)	180	24	122
20	ВТ9	1079 (110)	225	32	182,8
21	20	520 (53)	120	55	98,3
22	40ХН	559 (57)	180	35	107,3
23	ВЧ50-1,5	491 (50)	220	14	81,1
24	Р18	824 (84)	220	12	143
25	Нейзильбер МНЦ15-20	569 (58)	160	54	106
26	АК4-1	392 (40)	109	17	95,1

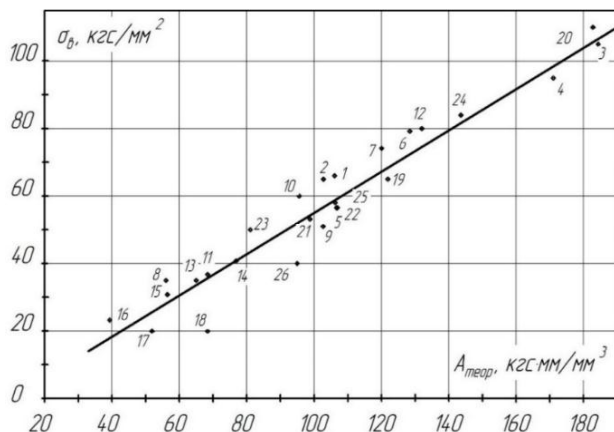


Рисунок 1 – Зависимость теоретической работы разрушения  $A_{\text{теор}}$  от временного сопротивления  $\sigma_0$  для различных конструкционных материалов (нумерация материалов согласно табл. 1)

Результаты проведенных расчетов представлены в табл. 2. Здесь рассматривались те же, что и в табл. 1, конструкционные материалы (их нумерация обозначена со «звездочкой»). При этом, силы резания определялись для трех переходов: для чернового, получистового и чистового точения.

При черновом точении глубина резания составляла 2 мм, подача резца – 0,8 мм/об, скорость резания обеспечивалась в пределах 55 – 90 м/мин; при получистовом точении глубина резания составляла 0,8 мм, подача резца – 0,24 мм/об, а скорость резания обеспечивалась в пределах 80 – 140 м/мин; при чистовом точении глубина резания составляла 0,2 мм, подача резца – 0,1 мм/об, скорость резания обеспечивалась в пределах 130 – 180 м/мин. В качестве режущего инструмента использовались проходные резцы с главным углом в плане  $45^\circ$ , оснащенные пластинками из твердого сплава T15K6 и BK8, а также быстрорежущей стали P6M5. В результате при черновом точении площадь среза составляла для всех образцов  $1,6 \text{ мм}^2$ , объем 1 витка срезаемого слоя –  $301,4 \text{ мм}^3$ ; при получистовом точении площадь среза –  $0,19 \text{ мм}^2$ , объем 1 витка срезаемого слоя –  $33,4 \text{ мм}^3$ ; при чистовом точении площадь среза –  $0,02 \text{ мм}^2$ , объем 1 витка срезаемого слоя –  $3,4 \text{ мм}^3$ .

Значения сил резания определялись по известным эмпирическим зависимостям [2, 6] и представлены для соответствующих режимов резания в табл. 2. В результате, удельная механическая работа разрушения, определяемая по силам резания, составила:

$$A_{\text{уд.мех.}} = \frac{A_{\text{мех.}}}{V}, \quad (4)$$

где V – объем срезаемого металла.

Таблица 2 – Удельная механическая работа разрушения при черновом, получистовом и чистовом точении

№ п/п	Обра- тываемый материал (в состоянии поставки)	Силы резания ( $P_z$ ), кгс			Работа разрушения ( $A_{\text{мех.}}$ ), кгс·мм			Удельная работа разрушения ( $A_{\text{уд.мех.}}$ ), кгс·мм/мм <sup>3</sup>		
		Черн. точение	П/чист. точение	Чист. точение	Черн. точение	П/чист. точение	Чист. точение	Черн. точение	П/чист. точение	Чист. точение
		$P_{z1}$	$P_{z2}$	$P_{z3}$	$A_{\text{мех.1}}$	$A_{\text{мех.2}}$	$A_{\text{мех.3}}$	$A_{\text{уд.мех.1}}$	$A_{\text{уд.мех.2}}$	$A_{\text{уд.мех.3}}$
1*	ШХ15	247,9	37,5	4,8	46630	6573,8	817,9	154,7	196,8	240,6
2*	40Х13	312,1	49,9	6,6	58709,8	8754,4	1126,9	194,8	262,1	331,5
3*	60С2	330,5	49,9	6,4	60779	8732,5	1080,8	201,7	261,5	317,9
4*	ВТ3-1	285,6	43,3	5,2	53807	7603	888,5	178,5	227,6	261,3
5*	50	256,8	38	4,5	48230,4	6680,4	769,6	160	199	226,1
6*	9ХС	278,4	42,9	5,4	52339,2	7520,4	919,6	173,7	225,2	270,5
7*	38Х2МЮА	272,9	41,2	5,3	51295,8	7219,6	902,6	170,2	216,2	265,5
8*	СЧ21-40	156,4	25	3,1	29465,8	4274,1	534,3	97,8	128	157,1
9*	12Х18Н10Т	277,5	44,4	5,9	52186,5	7792,2	1006	173,2	233,3	295,9
10*	12Х13	291,3	46,6	6,2	54795,8	8175,4	1057,1	181,8	244,8	310,9
11*	КЧ37-12	144,6	23,1	2,9	27184,8	4042,5	493	90,2	121	145
12*	20ХМ	279,8	42,2	5,4	52623	7397,7	919,6	174,6	221,5	270,5
13*	Ст3сп	145,6	22,4	2,8	27372,8	3920	476,8	90,8	117,4	140,3
14*	15Г	217,5	32,8	4,3	40889,1	5740,1	730,6	135,6	171,8	214,9
15*	Л80	116,2	18,6	2,3	21895	3269	397	72,6	97,9	116
16*	М1	104	16,6	2,1	19590,2	2924,8	355,2	65	87,6	104,5
17*	БрОЦС5-5-5	90	14,4	1,8	16956,3	2531,6	307,4	56,3	75,8	90,4
18*	АЛ-9	137,7	22	2,8	25942,7	3873,2	470,4	86,1	116	138,2
19*	У8	245,1	37	4,7	46103,3	6482,4	799,9	153	194,1	235,3
20*	ВТ9	314	47,6	5,7	59187,7	8363,3	977,4	196,4	250	287,5
21*	20	242,3	37,8	4,6	45639,9	6650,5	777,9	151,4	199,1	228,8
22*	40ХН	256,8	38,4	4,6	48378,3	6745,9	777,7	160,5	202	228,7
23*	ВЧ5-1,5	168,9	27	3,4	31753,2	4730,4	579,4	105,4	141,6	170,4
24*	Р18	300,2	45,4	5,8	56437,6	7954,1	988,3	187,3	238,2	290,7
25*	Нейзильбер МНЦ15-20	142,4	25,7	3,6	26772	4497,5	613,7	89,8	135,7	181,5
26*	АК4-1	187	29,9	$3,9$ $6$	34956,5	5232,5	665,3	115,9	156,7	195,7

Как видно из табл. 2, при переходе от чернового к чистовому точению работа разрушения  $A_{\text{мех}}$  резко снижается, а удельная работа разрушения  $A_{\text{уд.мех.}}$ , наоборот, возрастает, указывая на интенсификацию процесса резания.

На рис. 2 представлены зависимости средней удельной работы разрушения  $A_{\text{уд.мех.ср.}}$ , определенным по силам резания, от временного сопротивления  $\sigma_B$  для различных конструкционных материалов, рассмотренных ранее в табл. 1.

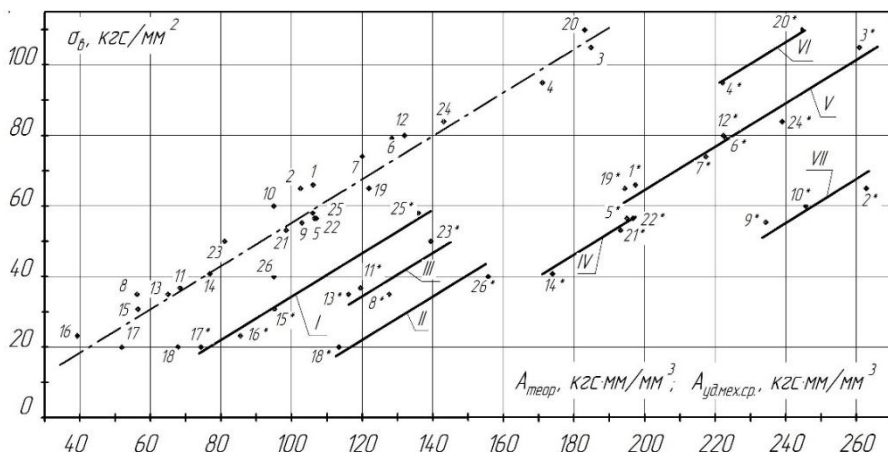


Рисунок 2 – Зависимость средней удельной работы разрушения  $A_{\text{уд.мех.ср.}}$  (—) и теоретической удельной работы разрушения  $A_{\text{теор.}}$  (— · —) от временного сопротивления  $\sigma_B$  для различных групп материалов

Здесь средняя удельная работа разрушения  $A_{\text{уд.мех.ср.}}$  определялась по зависимости (5):

$$A_{\text{уд.мех.ср.}} = \sum_{i=1}^3 \frac{A_{\text{уд.мех.}i}}{3}, \quad (5)$$

где  $i$  – этап обработки: черновой, получистовой, чистовой.

В отличие от рис. 1, на котором теоретическая работа разрушения представлена для всех групп рассматриваемых металлов в виде одной прямой линии  $A_{\text{теор.}}$ , на рис. 2 данные сгруппированы по химическому составу конструкционных материалов и аппроксимированы отдельными прямыми. На рис. 2 римскими цифрами обозначены следующие группы конструкционных материалов, представленные ранее в табл. 1 и 2:

I – цветные сплавы на основе меди;

II – цветные сплавы на основе алюминия;

III – чугуны (серые, ковкие, высокопрочные), стали углеродистые обыкновенного качества;

IV – стали конструкционные углеродистые качественные и низколегированные;

V – стали быстрорежущие, инструментальные углеродистые и легированные, подшипниковые и рессорно-пружинные, жаропрочные релаксационно-стойкие и конструкционные низколегированные;

VI – титановые сплавы;

VII – стали высоколегированные, коррозионно-стойкие, жаропрочные (нержавеющие).

Наблюдается общая закономерность: наклон всех прямых одинаков и параллелен теоретической прямой (2). Таким образом наблюдается та же прямо пропорциональная зависимость между удельной работой разрушения  $A_{уд.мех.ср.}$  и временным сопротивлением  $\sigma_b$  в пределах одной группы конструкционных материалов. Вместе с тем сравнение теоретической работы разрушения  $A_{теор}$  с удельной работой разрушения поверхностного слоя заготовки для различных металлов и сплавов по силам резания  $A_{уд.мех.ср.}$  показывает, что средняя удельная работа разрушения в процессе резания значительно превосходит затраты энергии на разрушение поверхностного слоя, определенные по истинным диаграммам напряжений для различных металлов. Соотношение между указанными работами разрушения можно оценить по коэффициенту соответствия  $K_c$  (коэффициенту выполнения полезной работы), определяемому зависимостью:

$$K_c = \frac{A_{теор}}{A_{уд.мех.ср.}}, \quad (6)$$

В табл. 3 представлены значения коэффициентов соответствия  $K_c$  для указанных в табл. 1 и 2 конструкционных материалов.

Таблица 3 – Значения коэффициентов соответствия для различных конструкционных материалов

Обрабатываемый материал	ШХ15	40Х13	60С2	ВТ3-1	50	9ХС	38Х2МЮА	СЧ21-40	12Х18Н10Т	12Х13	КЧ37-12	20ХМ	Ст3сп
№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
$K_c$	0,54	0,39	0,71	0,74	0,55	0,58	0,55	0,44	0,44	0,39	0,58	0,66	0,56
$1-K_c$	0,46	0,61	0,29	0,26	0,45	0,42	0,45	0,56	0,56	0,61	0,42	0,34	0,44



Продолжение табл. 3

Обрабатываемый материал	15Г	Л80	М1	БрОЦС5-5-5	АЛ-9	У8	ВТ9	20	40ХН	ВЧ50-1,5	Р18	Нейзильбер МНЦ 15-20	АК4-1
№ п/п	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
$K_c$	0,44	0,6	0,46	0,7	0,6	0,66	0,75	0,51	0,54	0,58	0,6	0,78	0,61
$1-K_c$	0,56	0,4	0,54	0,3	0,4	0,34	0,25	0,49	0,46	0,42	0,4	0,22	0,39

Указанное отличие в затратах работы на разрушение поверхностного слоя обрабатываемой заготовки связано с тем, что в процессе резания затраты энергии учитывают, как полезную (основную) работу деформирования и разрушения при резании, так и рассеиваемую энергию, не оказывающую полезного действия на процесс резания. В частности, это затраты на трение по передней и задней поверхности режущего инструмента, вызывающие износ последнего.

Если принять теоретическую работу разрушения материала заготовки, определенную по диаграммам истинных напряжений, за основную работу деформирования при резании металлов, то разница значений ( $1 - K_c$ ) определит потери на трение по передней и задней поверхности режущего инструмента, а также потери, связанные с не оптимальными условиями проведения процесса резания.

Как видно из табл. 3, указанные потери изменяются в достаточно широких пределах от (22 - 30) % для нейзильбера, оловянистой бронзы и титановых сплавов, отличающихся достаточно низкими потерями энергии на процесс резания, до (54 - 61) % потерь для меди, высоколегированных нержавеющей сталей, конструкционных легированных сталей, в частности, марганцовистых и других, отличающихся пониженной обрабатываемостью. Такое расхождение между долями полезной и рассеиваемой энергиями подтверждается и в работе Ярославцева В. М. [1]. Для основной же группы металлов потери энергии при разрушении материала составляют (35 - 45) %, что соответствует данным, представленным в работе В. Ф. Боброва [2]. Потери в пределах (35 - 45) % характерны и в целом для всей совокупности рассматриваемых конструкционных материалов.

**Выводы:**

1. Расчеты на основе диаграмм истинных напряжений и сил резания показали, что удельная механическая работа разрушения при резании прямо пропорциональна временному сопротивлению обрабатываемого конструкционного материала.

2. Реальный процесс резания сопровождается потерями энергии на трение, причем чем хуже обрабатываемость, тем больше потери на трение. Потери находятся в пределах от 22 до 61%, составляя в среднем для большинства конструкционных материалов (35 - 45) %.

3. Представленные данные показывают, что обрабатываемость резанием в заданных условиях в пределах одной группы конструкционных материалов может сравниваться на основе временного сопротивления обрабатываемых материалов. Этот критерий обеспечивает простоту принятия решений на практике. Вместе с тем сравнение обрабатываемости конструкционных материалов различных групп по этому критерию может дать значительную погрешность из-за непропорциональных потерь на трение. Поэтому необходим более комплексный критерий, учитывающий эти потери.

**Список использованных источников:** 1. Ярославцев, В. М. Энергетическая характеристика обрабатываемости материалов резанием / В. М. Ярославцев // *technomag.edu.ru*: Наука и образование: электронный научно-технический журнал МГТУ им. Н. Э. Баумана. 2012. – С. 27-34. 2. Бобров, В. Ф. Основы теории резания металлов / В. Ф. Бобров. – М.: Машиностроение, 1975. – 344 с. 3. Швеи, С. В. Системный анализ теории резания: монография / С. В. Швеи. – Сумы: Изд-во СумГУ, 2009. – 212 с. 4. Акилов, А. И. Оценка обрабатываемости материалов по затратам энергии разрушения / А. И. Акилов, И. Г. Чижов, Ю. А. Геращенко, С. А. Майборода // Вестник СумГУ. – 2013. – № 1. – С. 114-119. 5. Марковец, М. П. Диаграммы истинных напряжений и расчет на прочность / М. П. Марковец. – М.: Оборонгиз, 1947. – 140 с. 6. Справочник технолога-машиностроителя в 2-х т. / под ред. А. Г. Косиловой, Р. К. Мецержакова. – Изд. 4-е, перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1985. – Т. 2. – 496 с.

**Bibliography (transliterated):** 1. Jaroslavcev, V.M. Jenergeticheskaja harakteristika obrabatyvaemosti materialov rezaniem / V. M. Jaroslavcev // *technomag.edu.ru*: Nauka i obrazovanie: jelektronnyj nauchno-tehnicheskij zhurnal MGTU im. N. Je. Baumana. 2012. – S. 27-34. 2. Bobrov, V. F. Osnovy teorii rezanija metallov / V.F. Bobrov. – M.: Mashinostroenie, 1975. – 344 s. 3. Shvets, S.V. Sistemnyj analiz teorii rezanija: monografija / S.V. Shvets. – Sumy: Izd-vo SumGU, 2009. – 212 s. 4. Akilov, A.I. Ocenka obrabatyvaemosti materialov po zatratam jenerгии razrushenija / A.I. Akilov, I.G. Chizhov, Ju.A. Gerashhenko, S.A. Majboroda // Vestnik SumGU. – 2013. – № 1. – S. 114-119. 5. Markovets, M.P. Diagrammy istinnyh naprjazhenij i raschet na prochnost' / M.P. Markovets. – M.: Oborongiz, 1947. – 140 s. 6. Spravochnik tehnologa-mashinostroitelja v 2-h t. / pod red. A.G. Kosilovoj, R.K. Meshherjakova. – Izd. 4-e, pererab. i dop. – M.: Mashinostroenie, 1985. – T. 2. – 496 s.